

### **Bestimmung von Bodensteifigkeitswerten**

#### **Technisches Gebiet**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Bestimmung von Bodensteifigkeitswerten, wobei auch noch eine Bodenverdichtung mit dieser Vorrichtung vornehmbar ist.

Insbesondere im Tiefbau möchte man zum einen vor Beginn der Arbeiten wissen, wie sind die Bodenverhältnisse in Bezug auf eine später vorzunehmende Bodenverdichtung; welche Verdichtungswerte sind erreichbar; müssen womöglich Bodenbereiche abgetragen und eventuell neues Material aufgeschüttet werden, um eine vorgegebene Bodenverdichtung bzw. eine vorgegebene Tragfähigkeit beim Strassen- Eisenbahn, Flugpistenbau, ... überhaupt zu erreichen.

Bei einer bereits vorgenommen Bodenverdichtung sollte zum anderen ein bereits erreichter Verdichtungsgrad feststellbar sein, um einem Auftraggeber geforderte Verdichtungswerte garantieren zu können. Weiterhin möchte man wissen, wie sieht ein augenblickliches Verdichtungsprofil aus, und ist eine weitere Verdichtung mit den vorhandenen Mitteln überhaupt noch möglich. D.h. kann eine Verdichtung durch weiteres Überfahren mit einer Vibrationsplatte, einem Walzenzug, einer Grabenwalzen usw. noch gesteigert werden.

### **Stand der Technik**

In der deutschen Offenlegungsschrift DE-A 100 19 806 wurde versucht, ein "Springen" einer Bodenverdichtungsvorrichtung (insbesondere bei einer Vibrationsplatte) zu verhindern, da hierdurch eine Lockerung des bereits verdichteten Bodens eintreten sowie eine rapide Erhöhung des Maschinenverschleisses auftreten könnte. Hierzu wurden die Oberwellen der anregenden Schwingungen eines Bodenverdichtungselements detektiert. Es wurde davon ausgegangen, dass Oberwellen durch eine Rückwirkung einer überhöhten Schlagenergie auf einen bereits verdichteten Boden entstehen könnten.

In der DE-A 100 28 949 wurde ein System vorgestellt, welches sich zur Bestimmung eines Verdichtungsgrades sowohl bei Walzen wie auch bei Plattenrüttlern eignen sollte. Es wurde ein Wegsensor zur Messung einer vertikalen Bewegung des Oberbaus an diesem angeordnet. Es wurde ein Amplitudenwert einer bei maximal 60% der Anregungsfrequenz erfolgenden Schwingung des Unterbaus relativ zum Oberbau ermittelt. Der Quotient aus den vorgenannten Amplitudenwerten wurde als Mass für den aktuellen Verdichtungsgrad des Bodens herangezogen.

In der WO 98/17865 ist eine Bodenverdichtungsvorrichtung mit einem Beschleunigungsaufnehmer an einer Bandage beschrieben. Eine Verdichtung sollte immer dann optimal sein, d. h. am schnellsten und unter geringstem Energieaufwand vollziehbar sein, wenn Resonanz des Bodenverdichtungssystems auftrat. Das Bodenverdichtungssystem war aus dem zu verdichtenden Boden und der auf diesen einwirkenden Verdichtungseinrichtung gebildet.

In der US-A 4,546,425 wird dargelegt, wie ein zu verdichtender Boden bei gleichbleibenden Maschinendaten durch mehrere Überfahrten immer härter wurde und die verdichtende Walze zu springen begann. Um dieses Springen zu verhindern, wurde ein einstellbarer Exzenter verwendet.

In der US-A 5,695,298 wurde ein Verfahren zur Kontrolle eines Bodenverdichtungsvorgangs beschrieben. Die Bandage der Bodenverdichtungsvorrichtung wurde mit einer periodischen harmonischen Schwingung angeregt. Es wurden mit einem an einer Halterung und an einer Bandage angeordneten Beschleunigungsmesser Schwingungen dieser Bandage ermittelt. Das erhaltene Messsignal wurde auf ein erstes Bandpassfilter für die Anregungsfrequenz (oder höhere Frequenzen) und auf ein zweites Bandpassfilter für eine halbe Anregungsfrequenz gegeben. Mit einer Divisionsschaltung wurde das

Ausgangssignal des zweiten Bandpasses (Amplitude der halben Anregungsschwingung) durch das Ausgangssignal des ersten Bandpasses (Amplitude der Anregungsfrequenz) dividiert. Der Quotient sollte einen vorgegebenen Wert, beispielsweise 5% nicht überschreiten, damit noch ein stabiles Arbeiten unter Vermeidung instabiler Zustände möglich war.

In der US-A 5,727,900 ist eine Kontrolleinrichtung für eine Bodenverdichtungsvorrichtung sowie eine Methode zur Messung der Bodensteifigkeit beschrieben. Als Messdaten wurden hierbei die Beschleunigungswerte horizontal und vertikal einer Bandage der Bodenverdichtungsvorrichtung, die Position des Exzentrers, die Exzentrizität des Exzentrers und die Rollgeschwindigkeit der Verdichtungsvorrichtung gemessen. Es wurde ein Verfahren angegeben, wie eine Anregungsfrequenz für einen Vibrator bei einem mehrmaligen Überfahren ein- und desselben Bodenbereichs einzustellen ist.

Zur Ermittlung der Bodensteifigkeit wurde von einer Gleichung  $f = f_{\text{nom}} (G/G_{\text{nom}})^q$  ausgegangen, wobei  $G$  der Schubmodul des Bodens und  $f$  eine einzustellende Erregerfrequenz war.  $q$  war ein Erfahrungswert. Für eine vorgegebene Bodenverdichtung ergab sich eine optimale Verdichterfrequenz  $f_{\text{nom}}$ .  $G_{\text{nom}}$  war ein typischer Schubmodul des verdichteten Bodens.  $G$  und  $q$  waren aktuelle Bodendaten, wobei beim Verdichtungsvorgang  $G$  zu und  $q$  abnahmen.

Im Artikel von R. Anderegg in "Strassen- und Tiefbau" (No. 12 / 1997) ist eine flächen-deckende dynamische Verdichtungskontrolle bei Strassenvibrationswalzen beschrieben, wobei die Kontrolle der Überwachung laufender Verdichtungsarbeiten und einer Nachprüfung abgeschlossener Verdichtungsarbeiten dient. Walze und Boden bilden gemeinsam ein Schwingungssystem. Die Bandage wird durch eine mit einer Frequenz rotierende Unwucht erregt. Es wird festgestellt, dass mit zunehmender Verdichtung des Bodens die Bandage vom Boden abhebt, wodurch Oberschwingungen entstehen; bei einer weiteren Verdichtung tritt eine erste subharmonische Schwingung auf.

Die Erregerfrequenz wird auf eine zu erwartende Resonanzfrequenz des Schwingungssystems „Verdichtungsvorrichtung – Boden mit geforderter Verdichtung“ eingestellt. Mit zunehmender Verdichtung nimmt somit die Eigenfrequenz des Schwingungssystems zu und wandert dann in die Nähe der Eigenfrequenz, wodurch eine Vergrösserung der maximalen Bodenreaktionskraft eintritt. Um eine erreichte Bodenverdichtung beurteilen zu können, wird das Amplitudenverhältnis der ersten Oberwelle zur Erregerfrequenz und

der ersten Subharmonischen zur Erregerfrequenz betrachtet. Je grösser dieses Verhältnis ist, desto grösser sollte der erreichte Verdichtungsgrad sein.

Die US 6,244,102 B1 betrifft ein Verfahren zur Bestimmung des Verdichtungsgrads von ein- und insbesondere mehrschichtigen Bodenbereichen. Dazu wurde zunächst das Flächengewicht einer wunschgemäss verdichteten Schicht bestimmt, ausserdem die effektiv schwingende Masse eines Bodenverdichtungseinrichtung-Erdschicht-Untergrundsystems und die Eigenfrequenz des Systems bei der wunschgemässen Verdichtung. Aus dem Verhältnis zwischen einer gemessenen Schwingungsfrequenz des Systems und der bestimmten Eigenfrequenz sollte nun der Verdichtungsgrad bestimmt werden. Zur Durchführung des Verfahrens wies die Bodenverdichtungseinrichtung Sensoren zur Messung der Frequenz, Amplitude, Beschleunigung und weiterer Werte auf, welche über eine Schnittstelle mit einem Computer verbunden waren. Der Computer wertete die gemessenen Werte aus und lieferte optimale Parameter für den weiteren Verdichtungsvorgang, so dass die Amplitude, die Frequenz, die Masse der Unwucht etc. angepasst werden konnten. Die Einwirkungsfrequenz der Vorrichtung wurde auf einen Wert nahe der Resonanzfrequenz eingestellt.

### **Darstellung der Erfindung**

#### **Aufgabe**

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren aufzuzeigen bzw. eine Vorrichtung zu schaffen, mit dem bzw. mit der relative sowie auch absolute Bodensteifigkeitswerte über einer Bodenoberfläche auf eine einfache Art schnell ermittelbar sind.

#### **Lösung**

Die Lösung der Aufgabe erfolgt verfahrensmässig durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 sowie vorrichtungsmässig durch die Merkmale des Patentanspruchs 8.

Kern der Erfindung ist, wie aus **Figur 1** ersichtlich ist, die Verwendung nur einer einzigen Maschine (Vorrichtung) für Absolutmessungen und Relativmessungen von Bodenverdichtungswerten sowie auch zum Verdichten von Böden. Die Absolutmessungen benötigen einen gewissen Zeitaufwand, um eine Resonanz eines Schwingungssystems, gebildet aus Vibrationseinheit und Bodenbereich, auf dem sich die Vibrationseinheit im dauernden Kontakt mit der Bodenoberfläche befindet, einzustellen. Die Ermittlung von

Relativwerten ist ein schnelles Verfahren; die Werte sind direkt beim Überfahren der Bodenoberfläche erhältlich. Wird diese Maschine auf eine definierte Bodenzusammensetzung (Lehm, Sand, Kies, Lehmboden mit einem vorgegebenen Kies- / Sandanteil, ...) gemäss einem unten angeführten Verfahren geeicht, so können auch bereits beim Überfahren Absolutwerte der Bodenverdichtung (Bodensteifigkeit) ermittelt werden.

Da diese Maschine eine Vibrationseinheit mit einer periodischen Erregerkraft hat, können selbstverständlich auch Bodenverdichtungen vorgenommen werden.

Die erfindungsgemäss Bestimmung relativer Werte eines verdichteten bzw. zu verdichtenden Bodens ist erfindungsgemäss ein äusserst schnelles Verfahren. Es lässt sich hierdurch ermitteln, wo der Boden bereits gut und wo er weniger gut verdichtet ist. Man kann somit auch abschätzen, ob eine Bodenverdichtung durch weiteres Überfahren noch gesteigert werden kann, oder ob ein bereits erreichter Bodenverdichtungsgrad (erreichte Bodensteifigkeit) mit den vorhandenen Mitteln noch wesentlich vergrösserbar oder nicht mehr vergrösserbar ist.

Die Ermittlung eines absoluten Bodensteifigkeitswertes wurde bisher mit einem ge normten, sogenannten bekannten Plattendruckversuch vorgenommen. Bei diesem Plattendruckversuch wird eine Platte mit 30 cm Durchmesser mit einer vorgegebenen Druckkraft beaufschlagt und die Setzung gemessen. Es handelt sich hier um ein statisches Verfahren. Dieses Messverfahren ist durch die Normen definiert und nur aufwendig durchführbar. Der absolute Verdichtungswert wird immer an vorgegebenen Orten, also punktspezifisch, ermittelt. Ist ein Absolutwert an einem Ort einmal ermittelt, ist in der Regel nur noch von Interesse, wie sieht der Verdichtungsverlauf (Verdichtungsprofil) in der Umgebung aus.

Erfindungsgemäss wird nun vorgeschlagen, die Absolutmessung auch mit der für die Relativmessung vorgesehenen Vibrationseinheit vorzunehmen. Um sowohl eine Absolut- wie auch eine Relativmessung von Bodenverdichtungsgraden bzw. von Bodensteifigkeitswerten vorzunehmen, wird lediglich die auf eine Vibrationseinheit einwirkende zeitveränderliche Kraft verändert.

Wie unten näher ausgeführt, werden die Relativwerte dadurch ermittelt, dass zu einer Einwirkungsfrequenz auf die Vibrationseinheit mehrere Subharmonische aus der Schwingungsform des Schwingungssystems ermittelt werden und aus sämtlichen Subharmonischen zur Einwirkungsfrequenz diejenige mit der tiefsten Frequenz bestimmt wird, wobei die Bodensteifigkeit umso höher ist, je tiefer die Frequenz der

tiefsten Subharmonischen ist. Die Vibrationseinheit befindet sich hierbei in einem sogenannten "chaotischen Schwingungszustand".

Die Absolutwerte werden ermittelt, in dem die Vibrationseinheit im unten beschriebenen Auflastbetrieb arbeitet.

"Chaotischer Schwingungszustand" und "Auflastbetrieb" der Vibrationseinheit unterscheiden sich lediglich durch eine in ihren Werten veränderte, zeitveränderliche, auf die Vibrationseinheit einwirkende Kraft.

Vereinfacht ausgedrückt, ist die zeitveränderliche Kraft auf die Vibrationseinheit bei einer Absolutmessung derart, dass die Vibrationseinheit in Resonanz auf der Bodenoberfläche immer im Bodenkontakt schwingt. Bei einer Relativmessung hingegen springt die Vibrationseinheit, d.h. sie hebt ab und kann infolge dieses Abhebens unter einem gleichzeitigem Messen relativer Bodenverdichtungsgrade bzw. einer relativen Bodensteifigkeit leicht über die Bodenoberfläche bewegt werden. Relative, den Verdichtungszustand kennzeichnende Werte werden direkt beim Überfahren erhalten.

Zur Absolutmessung wird auf die Vibrationseinheit eine zeitveränderliche Erregerkraft als periodische erste Kraft mit einem maximalen, gegen die Bodenoberfläche senkrecht gerichteten, ersten Schwingungswert erzeugt. Die Frequenz der Erregerkraft bzw. deren Periode wird derart eingestellt bzw. verstellt, bis ein Schwingungssystem, gebildet aus der Vibrationseinheit und einem zu verdichtenden bzw. auszumessenden Bodenbereich, mit dem die Vibrationseinheit in dauerndem Oberflächenkontakt ist, in Resonanz kommt. Die Resonanzfrequenz  $f$  wird festgehalten bzw. abgespeichert. Ferner wird ein Phasenwinkel  $\varphi$  zwischen dem Auftreten eines maximalen Schwingungswertes der Erregerkraft und einem maximalen Schwingungswert einer Schwingungsantwort des oben genannten Schwingungssystems ermittelt.

Arbeitet man z. B. mit einer Vibrationplatte, so weiss man die schwingende Masse  $m_d$  des Unterwagens, und man weiss auch ein statisches Moment  $M_d$  eines Unwuchterschers, wobei hier sämtliche schwingende Unwuchten zu berücksichtigen sind. Neben dem Phasenwinkel  $\varphi$  wird die Amplitude  $A$  des Unterwagens gemessen. Aus der schwingenden Masse  $m_d$  [kg · m], der Resonanzfrequenz  $f$  [Hz], dem statischen Moment  $M_d$  [kg · m], der Amplitude  $A$  [m] und dem Phasenwinkel  $\varphi$  [ $^\circ$ ] kann mit der nachfolgenden Beziehung eine absolute Bodensteifigkeit  $k_B$  [MN/m] bestimmt werden:

$$k_B = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot (m_d + \{M_d \cdot \cos \varphi\}/A) \quad \{A\}$$

Aus der ermittelten Bodensteifigkeit  $k_B$  (gilt für Absolut- wie auch für Relativwerte) lässt sich ein Elastizitätsmodul des betreffenden Bodenteilstücks mit der nachfolgenden Formel ermitteln:

$$E_B [\text{MN/m}^2] = k_B \cdot \text{Formfaktor}$$

Der Formfaktor kann mit einer kontinuumsmechanischen Betrachtung eines Körpers, welcher sich mit einem elastischen halbunendlichen Raum in Kontakt befindet, gemäss „Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens“, Bd. 10, Sept./Okt. 1939, Nr. 5, Berlin, S. 201 – 211, G. Lundberg, „Elastische Berührung zweier Halbräume“, ermittelt werden.

Um Relativwerte zu ermitteln, wobei es sich hier um ein schnelles Verfahren handelt, wird die Erregerkraft derart erhöht, bis ein Springen der Vibrationseinheit eintritt. Die Erregerfrequenz wird man in der Regel überresonant wählen; man kann aber auch mit der Resonanzfrequenz oder unterresonant arbeiten; in diesem Fall muss die Unwucht entsprechend verändert werden.

Auch wird man jetzt nicht mehr die Erregerkraft senkrecht zur Bodenoberfläche wirken lassen, sondern derart, dass sich die Vorrichtung mit der Vibrationseinheit über eine Bodenoberfläche selbständig bewegt und von einem Vibrationsplattenführer nur noch in der gewünschten Richtung geführt werden muss. Die Messmittel der Vorrichtung sind in diesem Fall derart ausgebildet, dass lediglich eine Frequenzanalyse der Schwingungsantwort an der Vibrationsplatte vorgenommen wird. Es wird durch Filterschaltungen eine zur Erregerfrequenz tiefste subharmonische Schwingung ermittelt. Je tiefer die tiefste subharmonische Schwingung ist, desto grösser ist die erreichte Bodenverdichtung. Die Messung lässt sich noch verfeinern, indem Amplitudenwerte in der Schwingungsantwort für alle subharmonischen Schwingungen und eine erste Oberwelle zur anregenden Frequenz ermittelt werden. Diese Amplitudenwerte werden unter Verwendung von Gewichtsfunktionen ins Verhältnis zur Amplitude der Erregerfrequenz gemäss nachfolgender Gleichung gesetzt:

$$s = x_0 \cdot A_{2f}/A_f + x_2 \cdot A_{f/2}/A_f + x_4 \cdot A_{f/4}/A_f + x_8 \cdot A_{f/8}/A_f \quad \{B\}$$

$x_0$ ,  $x_2$ ,  $x_4$  und  $x_8$  sind Gewichtungsfaktoren, deren Ermittlung unten beschrieben ist.  $A_f$  ist der maximale Schwingungswert der auf die Vibrationseinheit wirkenden erregenden Kraft.  $A_{2f}$  ist der maximale Schwingungswert einer ersten Oberwelle zur erregenden Schwingung.  $A_{f/2}$  ist ein maximaler Schwingungswert einer ersten Subharmonischen mit

der halben Frequenz der erregenden Schwingung.  $A_{f/4}$  und  $A_{f/8}$  sind maximale Schwingungswerte einer zweiten bzw. dritten Subharmonischen mit einer Viertelfrequenz bzw. einer Achtelfrequenz der erregenden Schwingung.  $A_{2f}$ ,  $A_{f/2}$ ,  $A_{f/4}$  und  $A_{f/8}$  werden aus der Schwingungsantwort ermittelt.

Je grösser nun der Wert von  $s$  ist desto grösser ist auch die Bodenverdichtung. Da lediglich für eine Beurteilung der Bodenverdichtung maximale Schwingungswerte und deren Verhältnisse unter einer Summenbildung ermittelt werden müssen, handelt es sich hier um ein äusserst schnelles Messverfahren.

Bestimmt man nun die oben angeführten Gewichtungswerte, so folgt aus der Relativmessung eine Absolutmessung, wobei der Erhalt absoluter Werte immer an ein- und dieselbe Bodenzusammensetzung (siehe bereits oben (Lehm, Sand, Kies, Lehmboden mit einem vorgegebenen Kies- / Sandanteil, ...)) gebunden ist.

Die ermittelten Werte  $s$  kann man nun je nach unterschiedlicher Werthöhe auf zugeordnete Anzeigeleuchten geben. Es ist dann beim Überfahren von Bodenteilbereichen eines Bodenbereichs vorgegebener Bodenzusammensetzung auf einen Blick erkenntlich wie der Verlauf eines Bodenverdichtungsgrades ist. Wird jeweils nach dem Verdichtungsvorgang z. B. mit einer Grabenwalze, mit einem Walzenzug usw. gemessen, so kann eine Verdichtungszunahme ermittelt werden. Ist die Verdichtungszunahme nur gering oder wird keine Verdichtungszunahme ermittelt, bringt auch ein weiteres Überfahren keine weitere Verdichtungszunahme. Ist dennoch eine weitere Verdichtungszunahme gefordert, muss mit anderen Verdichtermitteln gearbeitet werden, oder die Bodenzusammensetzung durch einen Materialaustausch geändert werden.

Da mit der hier angeführten Vorrichtung sowohl Absolutmessungen wie auch schnelle Relativmessungen der Bodenverdichtung vorgenommen werden können, ist es möglich, wie nachfolgend ausgeführt, nach einer Eichung auch schnelle Absolutmessungen vorzunehmen. Ausgehend von obiger Gleichung {A} ist bei bekannten „Maschinenparametern“: schwingende Masse  $m_d$  des Unterwagens und statisches Moment  $M_d$  eines Unwuchterregers, sofern eine Vibrationsplatte verwendet wird, und Messung der Schwingungsamplitude  $A$  des Unterwagens, der Resonanzfrequenz  $f$  [Hz] sowie des Phasenwinkels  $\varphi$  [°] die absolute Bodensteifigkeit  $k_B$  [MN/m] eines Bodenteilbereichs ermittelbar.

Entsprechend den vier Gewichtungsfaktoren  $x_0$ ,  $x_2$ ,  $x_4$  und  $x_8$  in Gleichung {B} werden nun auf vier unterschiedlichen Bodenteilbereichen des Bodenbereichs mit jeweils einer Absolutmessung Bodensteifigkeitswerte  $k_{B1}$ ,  $k_{B2}$ ,  $k_{B3}$  und  $k_{B4}$  ermittelt, wobei hierbei unterschiedliche Bodensteifigkeiten bei derselben Bodenzusammensetzung sich ergeben sollten.

Nach der Ermittlung der Bodensteifigkeitswerte  $k_{B1}$ ,  $k_{B2}$ ,  $k_{B3}$  und  $k_{B4}$  werden die maximalen Schwingungswerte  $A_f$ ,  $A_{2f}$ ,  $A_{f/2}$ ,  $A_{f/4}$  und  $A_{f/8}$  auf denselben vier Bodenteilbereichen ermittelt. Die erhaltenen Werte werden in die Gleichung {B} eingesetzt, wobei für s die Bodensteifigkeitswerte  $k_{B1}$ ,  $k_{B2}$ ,  $k_{B3}$  und  $k_{B4}$  verwendet werden. Man hat nun vier Gleichungen, aus denen die vier noch unbekannten Gewichtungsfaktoren ermittelbar sind.

Sind diese Werte in einem Speicher einer Auswerteeinheit der unten beschriebenen Vorrichtung abgelegt, so müssen beim Überfahren von Bodenteilbereichen nur noch die maximalen Schwingungswerte  $A_f$ ,  $A_{2f}$ ,  $A_{f/2}$ ,  $A_{f/4}$  und  $A_{f/8}$  ermittelt und mit den Gewichtungswerten verknüpft werden, um absolute Bodensteifigkeitswerte zu erhalten. Eine Absolutmessung kann nun genau so schnell wie die oben angeführten Relativmessungen vorgenommen werden.

Ändert sich die Bodenzusammensetzung, so können noch Relativmessungen vorgenommen werden; eine Nacheichung sollte jedoch vorgenommen werden. Gewichtungswerte für unterschiedliche Bodenzusammensetzungen kann man in einem Speicher der Vorrichtung ablegen und Messungen innerhalb einer durch eine Bodenzusammensetzung vorgegebenen Toleranz vornehmen. Es sollte jedoch bei sich ändernden Bodenzusammensetzungen, um eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten, immer eine Eichung vorgenommen werden. Eine Eichung ist zwar bedeutend langsamer als die schnelle Relativmessung; bei etwas Übung lässt sich jedoch eine Eichung in wenigen Minuten vornehmen.

Die ermittelten Bodenverdichtungswerte wird man vorzugsweise zusammen mit den jeweiligen Ortskoordinaten der Messung abspeichern bzw. gleich an eine Zentrale wie z.B. ein Baubüro übermitteln, damit entsprechende Schritte für benötigte Verdichtungsmaschinen bzw. Arbeiten an Boden geplant bzw. in Auftrag gegeben werden können. Statt an eine örtlich entfernte Zentrale zu übermitteln, kann auch an einen Walzenführer übermittelt werden, der gerade dabei ist am ausgemessenen Bodenbereich eine Bodenverdichtung vorzunehmen und dem durch die Messwerte mitgeteilt wird, ob weitere Ver-

dichtungen noch zu einer Vergrösserung der Bodensteifigkeit führen könnten. Selbstverständlich können die absoluten wie auch die relativen Bodenwerte direkt an der auszumessenden Vibrationsplatte angezeigt und dargestellt werden.

Als Vibrationseinheit wird man vorzugsweise eine Vibrationsplatte nehmen, da es sich hier um ein preisgünstiges Produkt handelt. Es können aber auch andere Maschinen, Grabenwalze und Walzenzug verwendet werden. Die Vibrationsplatte hat jedoch den Vorteil, dass die Kontaktfläche mit der Bodenoberfläche definiert ist.

Als anregende Kraft wird man vorzugsweise zwei gegenläufig angetriebene Unwuchten nehmen. Die gegenseitige Lage der beiden Unwuchten muss gegeneinander verstellbar sein, damit einmal die Erregerkraft senkrecht auf die Bodenoberfläche (für eine Eichung und eine Absolutmessung) und einmal entgegen der Bewegungsrichtung schräg nach hinten richtbar ist. Auch muss die Frequenz der Erregerkraft (hier beispielsweise die gegenläufige Umdrehungszahl der Unwuchten) einstellbar sein, um in Resonanz gehen zu können. Das Suchen der Resonanzfrequenz kann manuell erfolgen; man wird es aber in vorteilhafter Weise durch einen automatischen „Scan“-Vorgang vornehmen lassen, der sich auf die Resonanzfrequenz einpendelt.

In einer vorteilhaften Weise könnte auch das statische Unwuchtmoment einstellbar ausgebildet werden, indem beispielsweise eine radiale Verstellung der Unwuchtmasse bzw. -massen vornehmbar ist.

Bei der Erfindung wird im Gegensatz zu den bekannten Bodenverdichtungsverfahren bzw. den bekannten Bodenverdichtungsvorrichtungen nicht versucht, Subharmonische der Erregerfrequenz (Einwirkungsfrequenz) zu eliminieren. Im Gegenteil, sie werden bewusst ausgewertet. Es wird nämlich von der Erkenntnis ausgegangen, wie in der Detailbeschreibung dargelegt ist, dass die Frequenzen der Subharmonischen einen erreichten Bodenverdichtungsgrad definieren. Je tiefer die Frequenz der tiefsten Subharmonischen ist, desto grösser ist der Bodenverdichtungsgrad, über den eine Bodenkontakteinheit einer Bodenverdichtungsvorrichtung bewegt wird.

Man kann nun die Bodenkontakteinheit, welche mit dem zu verdichtenden bzw. bereits verdichteten Boden in Kontakt ist, mit einer einzigen Sinus-Schwingung in der Regel durch einen umlaufenden Exzenter oder durch zwei winkelmässig gegeneinander verstellbare Exzenter kraftmässig beaufschlagen. Es können aber auch mehrere Exzenter mit unterschiedlichen Umlauffrequenzen verwendet werden. Zu jeder dieser Frequenzen ergibt sich dann eine Reihe von Subharmonischen je nach erreichtem Bodenverdich-

tungsgrad. Werden mehrere "Grundfrequenzen" verwendet, kann eine detailliertere Aussage über die erreichte bzw. die zu messende Bodenverdichtung gemacht werden.

Vorzugsweise wird man jedoch die Einwirkungsfrequenz auf die Bodenkontakteinheit einstellbar wählen. Bei einer einstellbaren Frequenz kann nämlich eine Resonanz des Schwingungssystems, bestehend aus Bodenkontakteinheit und dem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich, ermittelt werden. Ein Arbeiten in Resonanz ergibt eine Verdichtung bei reduzierter Verdichtungsleistung. Da das Schwingungssystem aufgrund der zu erbringenden Verdichtungsleistung ein gedämpftes System ist, ergibt sich aus dem Grad der Dämpfung ein Phasenwinkel zwischen der maximalen Amplitude der Anregung (z.B. Kraft durch die rotierenden Unwuchten) und der Schwingung des Systems = Schwingung der Bodenkontakteinheit). Um diesen Phasenwinkel bestimmen zu können, wird man auf der Bodenkontakteinheit neben einem Sensor für die Subharmonischen (sowie auch für die Resonanzfrequenz und Oberwellen {Harmonische}) einen Sensor anbringen, der die zeitliche Auslenkung in Bodenverdichtungsrichtung misst. Die zeitliche Auslenkung der Anregung (Kraftaufbringung auf die Bodenkontakteinheit) kann ebenfalls gemessen werden; man kann sie jedoch leicht aus der augenblicklichen Stellung der Unwucht bzw. der Unwuchten ermitteln. Die zeitliche Lage der maximalen Amplituden (Anregungsschwingung zur Schwingung der Bodenkontakteinheit) wird man mit einer Vergleichereinheit ermitteln. Die Anregung wird man vorzugsweise derart einstellen, dass die maximale Amplitude der Anregung um 90° bis 180°, vorzugsweise um 95° bis 130° der maximalen Amplitude der Bodenkontakteinheit vorausseilt. Die hierbei ermittelten Werte können, wie unten ausgeführt, bei einer veränderbaren Erregerfrequenz auch zur Ermittlung absoluter Verdichtungswerte herangezogen werden.

Vorzugsweise wird man auch die maximale Amplitude der anregenden Kraft einstellbar auslegen. Eine Verstellung der anregenden Kraft kann bei der Verwendung z.B. von zwei Unwuchten erreicht werden, welche mit gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit rotieren und deren winkelmässiger Abstand änderbar ist. Die Unwuchten können gleichsinnig oder auch gegensinnig bewegt werden.

Ergänzend sei bemerkt, dass das Auftreten von Subharmonischen, sofern eine eine Bodenkontakteinheit aufweisende Bodenverdichtungsvorrichtung nicht entsprechend ausgelegt ist, zu Maschinenschäden führen kann. Man wird deshalb Dämpfungs-elemente zwischen der jeweiligen Bodenkontakteinheit und den restlichen Maschinen-teilen derart auslegen, dass eine Übertragung der Subharmonischen gedämpft wird. Man kann natürlich die gesamte Bodenverdichtungseinheit derart auslegen, dass die

tieffrequenten Subharmonischen keinen Schaden anrichten; deren Frequenz ist ja gemäss den Ausführungen in der Detailbeschreibung bekannt. Man kann aber auch die Amplitude der anregenden Kraft so weit herunterfahren, dass die Amplituden der Subharmonischen keinen Schaden anrichten bzw. nicht mehr vorhanden sind.

Aus der nachfolgenden Detailbeschreibung und der Gesamtheit der Patentansprüche ergeben sich weitere vorteilhafte Ausführungsformen und Merkmalskombinationen der Erfindung.

### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Die zur Erläuterung der Ausführungsbeispiele verwendeten Zeichnungen zeigen

- Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Erläuterung der Erfindung,
- Fig. 2 eine schematische Darstellung zur Erklärung eines analytischen Modells eines schwingungsfähigen Systems mit einer beispielsweise Vibrationsplatte und einem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich,
- Fig. 3 eine beispielsweise Anregung eines Unterwagens als Vibrationseinheit einer so genannten Vibrationseinheit,
- Fig. 4 ein Beispiel einer Umsetzung eines dimensionslosen Modells in einem Simulink-Modell,
- Fig. 5 ein Bewegungsverhalten einer Vibrationsplatte bei gleichbleibenden Maschinenparametern über einem unterschiedlich harten Untergrund,
- Fig. 6 eine einfache Ausführung zur Abschätzung einer Bodenverdichtung, wie man sie vorzugsweise an einer Vibrationsplatte anordnen kann und
- Fig. 7 eine Variante zu der in Figur 6 dargestellten Schaltung.

Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile und Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

### Wege zur Ausführung der Erfindung

Bei einer analytischen Beschreibung dynamischer Bodenverdichtungsvorrichtungen nimmt eine Betrachtung einer Bodenkontakteinheit zusammen mit dem verdichteten bzw. zu verdichtenden Boden als ein einziges System eine zentrale Rolle ein. In Figur 2 ist hierzu eine Vibrationsplatte 1 mit einer auf einer Bodenoberfläche 2 eines verdichte-

ten bzw. zu verdichtenden Bodenteilbereichs 3 eines Bodenbereichs in Kontakt stehenden Bodenplatte 4 eines Unterwagens 5 dargestellt. Die Bodenplatte 4 stellt eine Bodenkontakteinheit dar. Der Unterwagen 5 ist über schwingungsdämpfende Elemente 6 mit einem Oberwagen 7 verbunden, an dem eine Führungsdeichsel 9 angeordnet ist. Über die Führungsdeichsel 9 kann die Vibrationsplatte 1 im unten beschriebenen „springenden“ Zustand über einen die Bodenoberfläche 2 enthaltenden Bodenbereich geführt werden. An der Führungsdeichsel 9 sind Einstellelemente 10a, 10b und 10c angeordnet, mit denen ein statisches Unwuchtmoment  $M_d$ , eine Erregerfrequenz  $f$  und ein Winkel  $\alpha$  einer auf die Bodenoberfläche 2 wirkenden resultierenden Kraft einstellbar sind. Die Führungsdeichsel 9 hat ferner ein, hier beispielsweise als ovalen Ring ausgebildetes, Sicherungselement 11, welches in der gezeigten Stellung lediglich ein Leerlaufunwuchtmoment auf die Bodenplatte 4 wirken lässt. Das Leerlaufunwuchtmoment ist so klein eingestellt, dass keine Bewegung der Vibrationsplatte 1 in horizontaler Richtung über die Bodenoberfläche 2 erfolgen kann.

Eine einseitige Bindung zwischen einem zu verdichtenden bzw. auszumessenden Bodenteilbereich 3 (Unterbau) und der Vibrationsplatte 1 (Verdichtungs- bzw. Messgerät) ist der Hauptgrund für das Auftreten nachfolgend beschriebener nichtlinearer Effekte. Die einseitige Bindung wird begründet durch die Tatsache, dass zwischen dem Gerät 1 und dem Bodenteilbereich 3 Druckkräfte aber keine Zugkräfte übertragen werden können. Dementsprechend handelt es sich um eine kraftgesteuerte Nichtlinearität; das Gerät 1 verliert bei Überschreiten maximaler Bodenkraftwerte periodisch den Kontakt zum Bodenteilbereich 3 (Untergrund). Zusätzliche nichtlineare Elemente der Bodeneigenschaften, wie beispielsweise schubdehnungsgesteuerte Steifigkeitsveränderungen, können im Vergleich dazu vernachlässigt werden. Auch eine überlineare Federkennlinie von (Gummi-)Dämpfungselementen 6 zwischen Unter- und Oberwagen 5 und 7 ist von untergeordneter Bedeutung und beeinflusst die Rechenergebnisse einer analytischen Beschreibung nicht wesentlich.

Die Vibrationsplatte 1 als Verdichtungs- bzw. Messgerät hat generell eine Bodenkontakteinheit (Unterwagen 5 mit Bodenplatte 4) mit zwei gegenläufig rotierenden Unwuchten 13a und 13b (**Figur 2**) mit einer Gesamtmasse  $m_d$ , welche auch einen Unwuchterreger mit einschliesst.  $m_d$  symbolisiert die gesamte anregende schwiegende Masse. Auf den Unterwagen 5 stützt sich ein statisches Auflastgewicht des Oberwagens 7 mit einer Masse  $m_f$  (statisches Gewicht) über Dämpfungselemente 6 (Steifigkeit  $k_G$ , Dämp-

fung  $c_G$ ) ab. Das statische Gewicht  $m_f$  ergibt zusammen mit den Dämpfungselementen 6 ein fusspunkterregtes Schwingungssystem, das tief abgestimmt wird (tiefe Eigenfrequenz). Der Oberwagen 7 wirkt im Vibrationsbetrieb gegenüber den Schwingungen des Unterwagens 5 als Tiefpass zweiter Ordnung. Damit wird die in den Oberwagen 7 transmittierte Vibrationsenergie minimiert.

Der auszumessende, zu verdichtende bzw. verdichtete Boden des Bodenbereichs 3 ist ein Baustoff, für den, je nach untersuchten Eigenschaften, unterschiedliche Modelle existieren. Für den Fall des oben erwähnten Systems (Bodenkontakteinheit - Boden) kommen einfache Feder-Dämpfer-Modelle (Steifigkeit  $k_B$ , Dämpfung  $c_B$ ) zur Anwendung. Die Federeigenschaften berücksichtigen die Kontaktzone zwischen Bodenverdichtungseinheit (Unterwagen 5) und elastischem Halbraum (Bodenbereich). Im Bereich der Erregerfrequenzen des oben genannten Gerätes, die oberhalb der tiefsten Eigenfrequenz des Systems (Bodenkontakteinheit - Boden) liegen, ist die Bodensteifigkeit  $k_B$  eine statische, frequenzunabhängige Größe. Diese Eigenschaft konnte in der hier vorliegenden Anwendung im Feldversuch für homogene und geschichtete Böden nachgewiesen werden.

Führt man das Geräte- und Bodenmodell unter Berücksichtigung der einseitigen Bindung in ein Gesamtmodell zusammen, beschreibt das nachfolgende Gleichungssystem (1) für die Freiheitsgrade  $x_d$  des Unterwagens 5 und  $x_f$  des Oberwagens 7 die zugehörigen Bewegungsdifferentialgleichungen.

$$\left. \begin{array}{l} m_d \ddot{x}_d + F_B + c_G (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_G (x_d - x_f) = M_d \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + m_d g \\ m_f \ddot{x}_f + c_G (\dot{x}_f - \dot{x}_d) + k_G (x_f - x_d) = m_f g \end{array} \right\} \quad (1)$$

Ausgehend von einer einseitigen, bodenkraftgesteuerten Bindung ergibt sich:

$$\begin{aligned} F_B &= c_B \dot{x}_d + k_B x && \text{für } F_B > 0 \\ F_B &= 0 && \text{sonst} \end{aligned}$$

$m_d$ : schwingende Masse [kg] z.B. Unterwagen 5

$m_f$ : stat. Auflastgewicht [kg] z.B. Oberwagen 7

$M_d$ : stat. Moment Unwucht [kg m]

$x_d$ : Bewegung schwingende Masse [mm]

$x_f$ : Bewegung Auflastgewicht [mm]

$\Omega$ : Erregerkreisfrequenz [ $s^{-1}$ ]  $\Omega = 2\pi \cdot f$

f. Erregerfrequenz [Hz]

$k_B$ : Steifigkeit der Unterlage/des Bodenbereichs [MN/m];

$c_B$ : Dämpfung der Unterlage/des Bodenbereichs [MNs/m]

$k_G$ : Steifigkeit der Dämpfungselemente [MN/m]

$c_G$ : Dämpfung der Dämpfungselemente [MNs/m]

Eine Bodenreaktionskraft  $F_B$  zwischen Unterwagen 5 und auszumessenden, verdichteten bzw. zu verdichtendem Bodenbereich 3 steuert dabei die Nichtlinearität der einseitigen Bindung.

Die analytische Lösung der Differentialgleichungen (1) besitzt die folgende, allgemeine Form:

$$x_d = \sum_j A_j \cos(j \cdot \Omega \cdot t + \varphi_j) \quad (2)$$

j = 1 lineare Schwingungsantwort, Auflastbetrieb

j = 1,2,3,... periodisches Abheben (die Maschine verliert pro Erregungsperiode einmal den Kontakt zum Boden)

j = 1,1/2, 1/4, 1/8,... und zugehörige Oberwellen: Springen, Taumeln, chaotischer Betriebszustand

Für die nachfolgenden Betrachtungen des „Springens“ wird eine senkrecht auf die Bodenoberfläche 2 wirkende Kraft  $F_B$  angenommen. Bei der oben beschriebenen Vibrationsplatte hingegen wirkt diese Kraft nicht senkrecht auf die Bodenoberfläche 2, sondern schräg nach hinten, um z.B. eine springende Bewegung in Vorwärtsrichtung zu erhalten. Bei den nachfolgenden mathematischen Betrachtungen ist somit die senkrechte Komponente der schrägen Kraft einzusetzen. Die schräg auf die Bodenoberfläche wirkende Erregerkraft wird erreicht, indem die gegensinnig rotierenden Unwuchten 13a und 13b derart rotationsmäßig gegeneinander verschoben sind, dass ihre sich addierenden Unwuchtmomente der Unwuchten 13a und 13b einen maximalen Kraftvektor etwa unter einem Winkel von 20° nach rechts unten in Figur 3 haben. Zur Ermittlung der Absolutwerte (Resonanzfall) zeigt der maximale Kraftvektor (wäre identisch mit  $F_B$ ) senkrecht auf die Bodenoberfläche 2.

Eine numerische Simulation erlaubt die Berechnung der Lösungen der Gleichungen (1). Insbesondere für den Nachweis chaotischer Schwingungen ist die Verwendung numerischer Lösungsalgorithmen unerlässlich. Mit Hilfe analytischer Berechnungsverfahren,

wie der Mittelungsmethode, können für lineare und nichtlineare Schwingungen sehr gute Näherungslösungen und Aussagen grundsätzlicher Natur zu einer Bifurkation der Grundschwingungen getroffen werden. Die Mittelungstheorie ist beschrieben in Anderegg Roland (1998), "Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern, Fortschritte VDI, Reihe 4, VDI Verlag Düsseldorf. Dies erlaubt einen guten Gesamtüberblick über die auftretenden Lösungen. Bei mehrfach verzweigenden Systemen sind analytische Methoden mit einem unverhältnismässig hohen Aufwand verbunden.

Als Simulationswerkzeug wird das Programm Paket Matlab/Simulink® verwendet. Dessen graphische Benutzeroberfläche und die zur Verfügung stehenden Tools sind sehr geeignet zur Behandlung des vorliegenden Problems. Die Gleichungen (1) werden zuerst in eine dimensionslose Form transformiert, um eine höchstmögliche Allgemeingültigkeit der Resultate zu erreichen.

$$\text{Zeit: } \tau = \omega_0 t ; \quad \omega_0 = \sqrt{k_B / m_d}$$

$$\text{Resonanzverhältnis: } \kappa = \frac{\Omega}{\omega_0} \quad \text{mit } \Omega = 2\pi \cdot f$$

d.h.  $\kappa = f/f_0$ , wobei  $f$  die Anregungs- und  $f_0$  die Resonanzfrequenz [Hz] ist.

$\omega_0$  ist die Kreis-Resonanzfrequenz des Schwingungssystems "Maschine-Boden" [ $s^{-1}$ ].

$$\text{Ort: } \eta = \frac{x_d}{A_0} ; \quad \varsigma = \frac{x_f}{A_0} ; \quad \eta'' = \omega_0^2 \eta ; \quad \varsigma'' = \omega_0^2 \varsigma ; \quad \text{Amplitude } A_0 f \text{ ist frei wählbar}$$

$$\text{Materialkenngrößen: } \delta = \frac{c_B}{\sqrt{m_d k_B}} = 2d_B ; \quad \lambda_c = \frac{c_G}{c_B} ; \quad \lambda_k = \frac{k_G}{k_B} ;$$

$$\text{Massen und Kräfte: } \lambda_m = \frac{m_f}{m_d} ; \quad A_{th} = \frac{m_u r_u}{m_d} ; \quad \gamma = \frac{A_{th}}{A_0} ; \quad f_B = \frac{F_B}{k_B \cdot A_0} = k_B A_0 (\eta + \delta \eta') ;$$

$$\eta = \frac{x_d}{A_0} ; \quad \eta_0 = \frac{m_d \cdot g}{k_B A_0} ; \quad \varsigma_0 = \frac{m_f \cdot g}{k_B A_0} ;$$

$\eta'' + f_B + \lambda_c \delta (\eta' - \varsigma') + \lambda_k (\eta - \varsigma) = \gamma \kappa^2 \cos(\kappa \tau) + \eta_0$	$\text{wobei gilt: } f_B = \begin{cases} \delta \eta' + \eta & \text{falls } f_B > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Die resultierenden Gleichungen (3) werden graphisch mit Simulink® modelliert, siehe **Figur 4**. Die Nichtlinearität wird vereinfacht als eine rein kraftgesteuerte Funktion betrachtet und mit Hilfe des „Switch“-Blocks aus der Simulink-Bibliothek modelliert.

Das Koordinatensystem der Gleichungen (1) und (3) beinhaltet eine statische Einsenkung infolge des Eigengewichts (statisches Auflastgewicht  $m_f$ , schwingende Masse  $m_d$ ).

Im Vergleich mit Messungen, die aus der Aufintegration von Beschleunigungssignalen resultieren, muss die statische Einsenkung zu Vergleichszwecken im Simulationsresultat subtrahiert werden. Die Anfangsbedingungen für die Simulation sind alle "0" gesetzt. Die Resultate werden für den Fall des eingeschwungenen Zustands angegeben. Als Lösungssolver wird „ode 45“ (Dormand-Price) mit einer variablen Integrationsschrittweite (max. Schrittweite 0.1 s) im Zeitbereich von 0 s bis 270 s gewählt.

Für die Betrachtung des chaotischen Maschinenverhaltens der Vibrationsplatte 1 genügt es in der Regel, den schwingenden Teil zu untersuchen. Insbesondere bei gut abgestimmten Gummidämpferelementen sind in den Elementen (Unter- und Oberwagen) die dynamischen Kräfte gegenüber den statischen Kräften vernachlässigbar klein und es gilt  $\ddot{x}_f \ll \ddot{x}_d$ . In diesem Fall können die beiden Gleichungen in (1), bzw. (3) addiert werden und es ergibt sich eine Gleichung (4a) für einen Freiheitsgrad des schwingenden Elements  $x_d = x$ . Das zugehörige analytische Modell findet sich in **Figur 3**.

$$F_B = -m_d \ddot{x} + M_d \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + (m_f + m_d) \cdot g \quad (4a)$$

**F<sub>B</sub>** ist die auf den Bodenbereich wirkende Kraft; siehe **Figur 3**. Diese gewöhnliche Differentialgleichung 2. Ordnung wird in die beiden nachfolgenden Differentialgleichungen 1. Ordnung umgeschrieben:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{F_B}{m_d} + A_0 \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + \left(1 + \frac{m_d}{m_f}\right) \cdot g \end{aligned} \quad (4b)$$

$$\text{mit } A_0 = \frac{M_d}{m_d} \text{ und } F_B = c_B \dot{x}_d + k_B x \quad \begin{cases} \text{für } F_B > 0 \\ \text{sonst} \end{cases} \quad \text{als bodenkraftgesteuerte Nichtlinearität}$$

Es gilt die Identität  $x_2 = \dot{x}$ .

Daraus wird eine Phasenraum-Darstellung mit  $x_1(t) - x_2(t)$ , bzw.  $x(t) - \dot{x}(t)$  abgeleitet.

Die Phasenkurven, auch als Orbitale bezeichnet, sind im Fall linearer, stationärer und monofrequenter Schwingungen geschlossene Kreise bzw. Ellipsen. Bei nichtlinearen Schwingungen, bei denen zusätzlich Oberwellen auftreten (periodisches Abheben der Bandage vom Boden), sind die Oberwellen als aufmodulierte Periodizitäten zu erkennen. Erst bei Periodenverdoppelungen, also subharmonischen Schwingungen wie dem

„Springen“, mutiert der ursprüngliche Kreis zu geschlossenen Kurvenzügen, die Schnittpunkte in der Phasenraum-Darstellung aufweisen.

Es hat sich gezeigt, dass das Auftreten von subharmonischen Schwingungen in Form von Verzweigungen oder Bifurkationen ein weiteres, zentrales Element stark nicht-linearer und chaotischer Schwingungen ist. Im Gegensatz zu Oberwellen stellen subharmonische Schwingungen einen neuen, gesondert zu behandelnden Betriebszustand eines nichtlinearen Systems dar; dieser Betriebszustand unterscheidet sich stark vom ursprünglichen, linearen Problem. Oberwellen sind nämlich klein im Verhältnis zur Grundschwingung, d. h. die nichtlineare Lösung des Problems verbleibt, mathematisch betrachtet, in der Umgebung der Lösung des linearen Systems.

Eine Messwerterfassung kann in der Praxis durch den Impuls einer Hall-Sonde, welche den Null-Durchgang der Vibrowelle erfasst, ausgelöst werden. Damit lassen sich auch Poincaré-Abbildungen generieren. Werden die periodisch erfassten Amplitudenwerte in Funktion des variierten Systemparameters, in unserem Falle also der Bodensteifigkeit  $k_B$ , aufgetragen, entsteht das Bifurkations- oder sogenannte Feigenbaum-Diagramm (**Figur 5**). In diesem Diagramm erkennt man zum einen die Eigenschaft der sich bei steigender Steifigkeit im Bereich der Verzweigung schlagartig vergrößernden Amplituden, die Tangente an die zugehörige(n) Kurve(n) verläuft im Verzweigungspunkt vertikal. Deshalb ist in der Praxis auch keine zusätzliche Energiezufuhr für das Springen der Walze erforderlich. Das Diagramm zeigt weiter auf, dass bei steigender Steifigkeit (Verdichtung) weitere Verzweigungen folgen, und zwar in immer kürzeren Abständen bezogen auf die kontinuierlich zunehmende Steifigkeit  $k_B$ . Die Verzweigungen erzeugen eine Kaskade neuer Schwingungsanteile mit der jeweils halben Frequenz der vorhergehend tiefsten Frequenz des Spektrums. Da sich die erste Verzweigung aus der Grundschwingung mit der Frequenz  $f$ , bzw. Periode  $T$ , abspaltet, entsteht die Frequenz-Kaskade  $f, f/2, f/4, f/8$  etc. Analog zur Grundschwingung generieren auch die Subharmonischen Oberwellen und es entsteht ein Frequenzkontinuum im tiefen Bereich des Signalspektrums. Dies ist ebenfalls eine spezifische Eigenschaft des chaotischen Systems, im vorliegenden Fall also der vibrierenden Vibrationsplatte.

Man beachte, dass sich das System des Verdichtungsgerätes in einem deterministischen und nicht in einem stochastischen chaotischen Zustand befindet. Da die Parameter, welche den chaotischen Zustand bewirken, nicht alle messbar sind (nicht vollständig beobachtbar), kann der Betriebszustand der subharmonischen Schwin-

gungen nicht für die praktische Verdichtung prädictiert werden. Das Betriebsverhalten in der Praxis ist zudem durch viele Unwägbarkeiten gekennzeichnet, die Maschine kann durch den starken Kontaktverlust zum Boden wegrutschen, die Belastung der Maschine durch die tieffrequenten Schwingungen wird sehr hoch. Laufend können weitere Bifurkationen des Maschinenverhaltens (unverhofft) auftreten, die sofort starke Zusatzbelastungen zur Folge haben. Hohe Beanspruchungen treten auch zwischen Bandage und Boden auf; dies führt zur unerwünschten Auflockerung oberflächennaher Schichten und zieht Kornzertrümmerungen nach sich.

So wird bei neuen Geräten, die über eine aktive Regelung der Maschinenparameter in Funktion gemessener Größen verfügen (z.B. ACE: Ammann Compaction Expert) bei Auftreten der ersten subharmonischen Schwingung mit der Frequenz  $f/2$  sofort die Unwucht und damit die Energiezufuhr verringert. Diese Massnahme verhindert zuverlässig das unerwünschte Springen oder Taumeln der Bandage. Zudem garantiert eine kraftsteuerte Regelung von Amplitude und Frequenz des Verdichtungsgerätes eine Steuerung der Nichtlinearität und damit eine sichere Verhinderung des Springens/Taumelns, die ja letztlich die Folge der auftretenden Nichtlinearität ist.

Aufgrund der Tatsache, dass die subharmonischen Schwingungen einen jeweils neuen Bewegungszustand der Maschine darstellen, müssten Relativmessungen, z. B. zur Erfassung des Verdichtungszustandes des Bodens, für jede neu auftretende subharmonische Schwingung neu auf die Bezugsprüfverfahren, wie beispielsweise den Druckplattenversuch (DIN 18 196) geeicht werden. Auf diese Relativmessung kann verzichtet werden, wie unten erläutert wird.

Im Fall eines „Kompaktometers“, bei dem zur Verdichtungskontrolle das Verhältnis von erster Oberwelle  $2f$  zu Grundschwingung  $f$  verwendet wird, ändert sich mit dem Auftreten des Springens die Korrelation grundsätzlich; nur innerhalb des jeweiligen Verzweigungszustandes der Bewegung existiert ein linearer Zusammenhang des Messwerts mit der Bodensteifigkeit.

Bei konstant belassenen Maschinenparametern kann das kaskadenartige Auftreten der Bifurkationen und Oberwellen mit ihren zugehörigen Periodenverdoppelungen analog den Grosswalzen als Indikator für die zunehmende Bodensteifigkeit und Verdichtung dienen (relative Verdichtungskontrolle).

Während dem Walzen, vom Walzenzug bis zur handgeführten Grabenwalze, die Abrollbewegung der Bandagen für ihre Fortbewegung nutzen und damit kein direkter Zusam-

menhang zwischen Vibration und Vorwärtsbewegung besteht, ist die Vibrationsplatte für ihre Fortbewegung immer auf das periodische Abheben vom Boden angewiesen, gesteuert durch die Neigung ihres Richtschwingers. Deshalb sind die Vibrationen und die Fortbewegung miteinander direkt gekoppelt, Platten und Stampfer weisen in der Folge immer ein nichtlineares Schwingungsverhalten auf. Dadurch geraten die Geräte mit zunehmender Steifigkeit  $k_B$  schneller in den Bereich des Periodenverdoppelungsszenarios, chaotische Betriebszustände treten bei ihnen häufiger auf als bei Walzen.

Die durch eine mit der oben beschriebenen Vibrationsplatte erreichte und/oder bestimmte Bodensteifigkeit  $k_B$  kann, sofern auf genaue (exakte) Bodensteifigkeitswerte verzichtet wird und man nur eine Anzeige wünscht, welche angibt, ob die Bodensteifigkeit bei weiteren Überfahrungen mit der Vorrichtung ansteigt oder einen bereits zufriedstellenden Wert erreicht hat, stark vereinfacht und damit preisgünstig mit der nachfolgenden in **Figur 6** gezeigten Messvorrichtung **20** vorgenommen werden. Eine derartige Messvorrichtung **20** für einen Bodensteifigkeitsrichtwert wird man hauptsächlich bei den ohnehin preisgünstigen Vibrationsplatten einbauen.

Die Schwingungen des Unterwagens **5** werden mit einem Beschleunigungssensor **21** aufgenommen, mit einem Verstärker **23** verstärkt und mit einem Integrator **25** über einen vorgegebenen Zeitraum integriert. Die Integration wird vorgenommen, um aus dem Beschleunigungswert, gemessen mit dem Beschleunigungssensor **21** nach zweimaliger Intergration einen Weg zu erhalten. Anschliessend wird das Ausgangssignal des Integrators **25** auf mehrere Bandpassfilter **27** geführt. Das Bandpassfilter ist derart ausgelegt, dass einmal die Anregungsfrequenz  $f$ , die erste Oberwelle mit der doppelten Anregungsfrequenz  $2 \cdot f$ , die erste Subharmonische mit der halben Anregungsfrequenz  $f/2$ , die zweite Subharmonische mit einer viertel Anregungsfrequenz  $f/4$  und die dritte Subharmonische mit einer achtel Anregungsfrequenz  $f/8$  auf jeweils einen Ausgang **29a** bis **29e** transmittiert werden. Die Messvorrichtung hat hier beispielsweise für eine Überwachung der Frequenzen  $2 \cdot f$ ,  $f$ ,  $f/2$ ,  $f/4$  und  $f/8$  vier Quotientenbildner **31a** bis **31d**. Der Ausgang **29b** (Ausgangssignal zu  $f$ ) ist als Divisor mit allen Quotientenbildnern **31a** bis **31d** verbunden. Alle Ausgänge sind mit je einem Quotientenbildner **31a** bis **31d** verbunden. Der Ausgang **29a** (Ausgangssignal zu  $2 \cdot f$ ) ist als Dividend mit dem Quotientenbildner **31a** verbunden, dessen Ausgangssignal (Quotient) an dessen Ausgang **33a** anliegt. Der Ausgang **33a** ist über eine Normierungsschaltung **35** an zwei Leuchten **37a** in einem Anzeigetableau **39** geführt.

Analog wird mit den Ausgängen **29c** ( $f/2$ ), **29d** ( $f/4$ ) und **29e** ( $f/8$ ) verfahren, welche als Dividend auf die Quotientenbildner **31b**, **31c** bzw. **31d** geführt werden. Ein Ausgang **33b**, **33c** bzw. **33d** des Quotientenbildners **31b**, **31c** bzw. **31d** wird über die Normierungsschaltung **35** an jeweils zwei Leuchten **37b**, **37c** bzw. **37d** im Anzeigetableau **39** geführt. Leuchten nur die Leuchten **37a** ist der betreffende Bodenbereich noch nicht ausreichend verdichtet. Leuchten die Leuchten **37b** ist eine bereits bessere Verdichtung erreicht, wobei die Verdichtung dann bis zu den Leuchten **37d** immer besser wird. Leuchten beispielsweise die Leuchten **37b** auch bei mehrmaligem Überfahren mit der Vibrationsplatte nicht auf, so ist eine weitere Verdichtung, sei es aufgrund der Bodenzusammensetzung oder der Maschinendaten der verwendeten Vibrationsplatte, nicht möglich. Analoges gilt für die Leuchten **37c** bzw. **37d**.

Anstelle der beiden Leuchten könnte, sofern nur das Auftreten der Subharmonischen angezeigt werden soll, nur eine einzige Leuchte verwendet werden. Es wird jedoch mit der Messvorrichtung **20** nicht nur das Frequenzverhalten ermittelt, es werden auch die maximalen Schwingungsamplituden der einzelnen Schwingungen (Einwirkungsfrequenz  $f$ , Oberwellen  $n \cdot f$ , Subharmonische  $f/[2 \cdot n]$ ) ausgewertet. In **Figur 5** ("Feigenbaum Szenario") sind beim Auftreten der ersten Subharmonischen  $f/2$  für einen bestimmten Zustand die Amplituden **A(f)** und **A(f/2)** der Einwirkungsfrequenz  $f$  und der ersten Subharmonischen  $f/2$  eingezeichnet.

Ist ein durch die Normierungsschaltung **35** vorgegebener Amplitudenwert erreicht, leuchtet die jeweils zweite Leuchte der Leuchtenanordnung. Selbstverständlich kann auch die Leuchtstärke in Abhängigkeit der Amplitudenhöhe gesteuert werden.

Anstelle des Bandpassfilters **27** kann auch eine Einheit verwendet werden, welche eine schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier Transformation FFT) ausführt.

Anstelle eines Bandpassfilters **27** kann auch innerhalb von Zeitfenstern die jeweilige Schwingungsamplitude bestimmt werden. Hierbei wird man, ausgehend immer von der untersten Lage des Exzitators und bekannter Umdrehungsgeschwindigkeit, die Amplitudenwerte für die erste Oberwelle und entsprechenden Subharmonischen aufnehmen, sofern sie vorhanden sind.

In **Figur 7** ist eine Variante zu der in **Figur 6** dargestellten Schaltung dargestellt. Im Gegensatz zur Schaltung **20** in **Figur 6** wird in dieser Schaltung **40** ein zum Beschleunigungssensor **21** analog ausgebildeter Beschleunigungssensor **42** am Oberwagen **7** der Vibrationsplatte **1** angeordnet. Durch (nicht dargestellte) Dämpfungs-

elemente zwischen Ober- und Unterwagen erfolgt eine Schwingungsdämpfung. Die Ausgangssignale des Beschleunigungssensors 42 für die erste Oberwelle  $2f$  und die erste und zweite Subharmonische  $f/2$  und  $f/4$  werden nun im Gegensatz zur Schaltung 20 nicht integriert und als Beschleunigungssignale nach einer Verstärkung durch den Verstärker 23 in einem Bandpassfilter 41 bearbeitet. Die Signale sind nämlich in der Regel ausreichend hoch: Das Signal der dritten Subharmonischen  $f/8$  wird nun, da es in der Regel klein ist, mit einem Integrator 43 integriert und analog wie in Figur 5 verarbeitet. Es muss nicht erst ab der dritten Subharmonischen  $f/8$  integriert werden. Es kann auch bereits die zweite Subharmonische  $f/4$  oder erst die vierte Subharmonische  $f/16$  integriert werden.

Der Sensor zur Aufnahme der Schwingungsform des Schwingungssystems ist gemäss obiger Beschreibung am Unterwagen 5 oder am Oberwagen 7 angeordnet. Bei einer Anordnung am Oberwagen 7 sind Schwingungsbeeinflussungen durch die Dämpfungselemente, wie oben skizziert, zu beachten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die erfindungsgemäss Vorrichtung, mit der sowohl eine Relativmessung wie auch eine Absolutmessung der Bodenverdichtung (Bodensteifigkeit) vorgenommen werden kann, zwischen diesen beiden Zuständen umschaltbar ausgebildet ist. Die Anregungsfrequenz und/oder die Grösse der Unwucht sind veränderbar.

Bei der Relativmessung des Bodenverdichtungsgrades springt die Vibrationsplatte. Hierzu wird

- ◆ eine hohe Schwingungsfrequenz (hohe Umlaufgeschwindigkeit der Unwuchten) und
- ◆ eine grosse Unwucht verwendet sowie
- ◆ der maximale Unwuchtvektor je nach gewünschter Bewegungsrichtung gegen den Boden schräg nach vorne bzw. schräg nach hinten gerichtet.

Bei der Absolutmessung der Bodenverdichtung (Bodensteifigkeit) verbleibt die Vibrationsplatte am Messort (Auflastbetrieb). Dies setzt

- ◆ eine tiefe Schwingungsfrequenz,
- ◆ eine geringe Unwucht und

- ◆ einen maximalen Unwuchtvektor voraus, der senkrecht auf der Bodenoberfläche steht.

Die oben beschriebene Relativmessung ist ein sehr schnelles Verfahren zur Bestimmung des Verdichtungsgrades einer verdichteten Oberfläche (wo ist der Boden bereits gut und wo ist er noch schlecht verdichtet). Es wird lediglich über die Bodenoberfläche gefahren und der Verdichtungsgrad angezeigt. Eine Aufzeichnung kann auch in einem zugeordneten Koordinatennetz vorgenommen werden. Dieses Koordinatennetz kann mittels GPS oder sonstigen Triangulationsmethoden vorgegeben werden.

Die erfindungsgemäße Vibrationsplatte mit der oben angeführten wahlweisen bzw. automatischen Umstellung zwischen Relativ- und Absolutmessung der Bodenverdichtung, stellt eine kostengünstige, arbeitsintegrierte Verdichtungsüberwachung dar. Es kann auf einem vorgegebenen Bodenabschnitt festgestellt werden, ob

- ◆ die Verdichtung zugenommen hat und
- ◆ die Verdichtung homogen ist.

Es lassen sich ferner die absoluten Bodensteifigkeiten ermitteln. Der Baustellenführer oder der Auftraggeber können selber feststellen, ob die geforderten Verdichtungswerte vorhanden sind.

Wie bereits oben ausgeführt, sind bei der erfindungsgemäßen Vibrationsplatte die Vibrationsfrequenz, die Unwuchtamplitude und der Phasenwinkel zwischen Erregung und Schwingungsantwort einstellbar. Es lässt sich somit eine geregelte Vibrationsplatte herstellen, mit der

- ◆ automatisch eine optimale Verdichtung erreichbar,
- ◆ die Anzahl von Überläufen mit der Vibrationsplatte minimierbar und
- ◆ eine flächendeckende Verdichtungskontrolle vornehmbar ist sowie
- ◆ die Schwingungen, welche auf den Arm des Vibrationsplattenführers übertragen werden, stark verminderbar und
- ◆ aufgrund der Messwerte die Frequenz und Unwuchtamplitude dem jeweiligen Untergrund anpassbar sind (→ optimaler Verdichtungsvorgang) sowie

- ◆ eine Lebensdauerverlängerung der Maschine erreichbar ist, da schädliche Frequenzen und Amplituden erkannt und diese sofort in unschädliche Werte veränderbar sind.

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Bestimmung von Bodensteifigkeitswerten eines Bodenbereichs, wobei mit ein- und derselben selbst fortbewegbaren Vorrichtung (1) sowohl beim Verweilen auf wenigstens einem vorgegebenen Bodenteilbereich (3) des Bodenbereichs dessen absoluter Bodensteifigkeitswert ( $k_B$ ) ermittelt wird als auch während einem Überqueren mehrere Bodenteilbereiche des Bodenbereichs mehrere relative Bodensteifigkeitswerte ( $s$ ) ermittelt werden, wobei zur Ermittlung eines absoluten Bodensteifigkeitswertes ( $k_B$ ) eine Vibrationseinheit (5) der Vorrichtung (1) auf einen vorgegebenen Bodenteilbereich (3) gebracht, dort belassen und mit der Vibrationseinheit (5) in bleibendem Bodenoberflächenkontakt eine erste zeitveränderliche Erregerkraft zur Einwirkung gebracht wird, wobei die Vibrationseinheit (5) und der vorgegebene Bodenteilbereich (3) ein einziges Schwingungssystem darstellen und erste Daten einer ersten Schwingungsantwort des Schwingungssystems und zweite Daten der ersten zeitveränderlichen Erregerkraft ermittelt und aus den ersten und zweiten Daten ein absoluter Bodensteifigkeitswert  $k_B$  des vorgegebenen Bodenteilbereichs (3) bestimmt wird, zur Ermittlung mehrerer relativer Bodensteifigkeitswerte ( $s$ ) mehrerer Bodenteilbereiche die Vibrationseinheit (5) auf die Bodenoberfläche eines der Bodenteilbereiche des Bodenbereichs gebracht wird, auf die Vibrationseinheit (5) eine zweite zeitveränderliche Erregerkraft derart einwirkt, dass die Vibrationseinheit (5) von der Bodenoberfläche (2) abhebt und somit springend zu mehreren der Bodenteilbereiche bewegbar ist, dritte Daten einer zweiten Schwingungsantwort der Schwingung der Vibrationseinheit (5), hervorgerufen durch die zweite Erregerkraft, und vierte Daten der Schwingung der zweiten Erregerkraft ermittelt werden und aus den dritten und vierten Daten relative Bodensteifigkeitswerte ( $k_B$ ) der Bodenteilbereiche über dem Bodenbereich nacheinander laufend ermittelt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die erste zeitveränderliche Erregerkraft als periodische erste Kraft mit einem maximalen, gegen

die Bodenoberfläche (2) bis auf eine Einstelltoleranz senkrecht gerichtet, ersten Schwingungswert erzeugt wird und die Periodizität derart eingestellt wird, dass das Schwingungssystem in Resonanz ist und die ersten und zweiten Daten die Resonanzfrequenz und einen Phasenwinkel zwischen einer zeitlichen Abfolge maximaler Schwingungswerte der ersten Erregerkraft und der ersten Schwingungsantwort beinhalten.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite zeitveränderliche Erregerkraft mit einer zweiten periodischen Kraft erzeugt wird, die zweite Kraft einen maximalen Schwingungswert hat, welcher gegenüber einem ersten maximalen Schwingungswert einer ersten periodischen Kraft der ersten Erregerkraft derart erhöht ist, dass ein Abheben der Vibrationseinheit (5) von der Bodenoberfläche (2) erfolgt, wobei der zweite maximale Schwingungswert der zweiten periodischen Kraft schräg nach hinten in Bezug auf die Vibrationseinheit zur Bodenoberfläche (2) gerichtet ist, damit die Vibrationseinheit (5) in Vorwärtsrichtung bewegbar ist, und als dritte Daten der zweiten Schwingungsantwort eine tiefste ermittelte subharmonische Frequenz als ein Mass für eine relative Bodensteifigkeit (**s**) bestimmt wird, wobei eine relative Bodensteifigkeit (**s**) um so grösser ist, je tiefer die tiefste bestimmte subharmonische Schwingung ist.
  
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass als dritte Daten der zweiten Schwingungsantwort die Amplituden einer ersten Oberwelle sowie von Subharmonischen bei einer periodischen Anregung der Vibrationseinheit (5) durch die zweite Erregerkraft ermittelt werden, vorzugsweise dritte Daten sich an unterschiedlichen Orten befindenden Bodenteilbereichen eines Bodenbereichs zusammen mit den betreffenden Absolutwerten ermittelt und zur Vornahme einer Kalibrierung, welche es erlaubt, gemessene Relativwerte als Absolutwerte darzustellen, abgespeichert werden, wobei der Bodenbereich eine bis auf eine Toleranz gleiche Bodenzusammensetzung aufweist, die Amplitudewerte der dritten Daten ins Verhältnis zum maximalen Schwingungswert der Erregerschwingung mit zu ermittelnden individuellen Gewichtsfaktoren ins Verhältnis gesetzt eine Summe bilden, wobei der Summenwert der jeweilige ortspezifische

Absolutwert ist, und die individuellen Gewichtsfaktoren aus mehreren Messungen ermittelt werden, wobei die Anzahl Messungen der Anzahl Gewichtsfaktoren entspricht, wobei die Grösse der Summe nach einer Kalibrierung ein Mass für einen absoluten Bodenverdichtungsgrad bzw. eine absolute Bodensteifigkeit eines gerade überfahrenen Bodenteilbereichs ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die gegenüber einem ersten maximalen Schwingungswert einer periodischen Kraft der ersten Erregerkraft erhöhte zweite Kraft dadurch eingestellt wird, dass wenigstens eine Unwucht umläuft, vorzugsweise wenigstens zwei Unwuchten gegenläufig umlaufen, insbesondere zwei Unwuchten gegenläufig mit einer gegenseitigen Lageverstellung umlaufen, und deren Umlaufsdrehzahl entsprechend erhöht wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die gegenüber einem ersten maximalen Schwingungswert einer periodischen Kraft der ersten Erregerkraft erhöhte zweite Kraft dadurch eingestellt wird, dass wenigstens eine Unwucht umläuft und die Masseverteilung der wenigstens einen Unwucht radial verändert wird und, vorzugsweise eine Periodizität der zweiten Erregerkraft, bis auf Bodentoleranzen, einer Resonanzfrequenz des Schwingungssystems entspricht.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass zu relativen bzw. absoluten Bodensteifigkeitswerten jeweilige Ortskoordinaten eines Bodenteilbereichs ermittelt, die Werte der Bodensteifigkeit, insbesondere zusammen mit den Ortskoordinaten, abgespeichert und, vorzugsweise an eine Zentrale, übermittelt werden, wobei insbesondere die relativen Werte der Bodensteifigkeit zusammen mit einem vorgegebenen Ortskoordinatenraster abgespeichert werden.

8. Auf einer Bodenoberfläche selbst fortbewegbare Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7 zur Bestimmung von Bodensteifigkeitswerten eines Bodenbereichs mit einer mit der Bodenoberfläche in Kontakt bringbaren Vibrationseinheit, wobei die Vibrationseinheit (5) vorzugsweise auch zur Bodenverdichtung einsetzbar ist, die Vorrichtung (1) eine Krafterzeugungseinheit aufweist, mit der eine periodische, auf die Vibrationseinheit (5) einwirkende erste und von dieser sich unterscheidende zweite Erregerkraft erzeugbar ist, wobei die erste Erregerkraft mit der Krafterzeugungseinheit derart einstellbar ist, dass die maximale Schwingungsamplitude der ersten Erregerkraft senkrecht gegen die Bodenoberfläche richtbar ist, die Periode der ersten Erregerkraft derart einstellbar ist, dass Resonanz eines Schwingungssystems, gebildet aus Vibrationseinheit und einem vorgegebenen Bodenteilbereich des Bodenbereichs erreichbar ist, und die Vibrationseinheit (5) unter Einwirkung der ersten Erregerkraft einen Kontakt zu den Bodenteilbereichen des Bodenbereichs nie verliert, die zweite Erregerfrequenz mit der Krafterzeugungseinheit derart einstellbar ist, die maximale Schwingungsamplitude der zweiten Erregerkraft schräg gegen die Bodenoberfläche richtbar und die Erregerkraft derart gross ist, dass die Vibrationseinheit springend Bodenkontakt verliert, ein Messmittel aufweist, mit dem Schwingungsdaten der Erregerkraft sowie auch Schwingungsdaten der Vibrationseinheit als Schwingungsantwort ermittelbar sind, und eine Auswerteeinheit aufweist, mit der aus den Schwingungsdaten der Erregerkraft und den Daten einer Schwingungsantwort der Vibrationseinheit (5) wenigstens ein absoluter Wert einer Bodensteifigkeit eines vorgegebenen Bodenteilbereichs des Bodenbereichs mittels der ersten Erregerkraft bestimmbar ist und mehrere relative Werte von Bodensteifigkeiten vorgegebener Bodenteilbereiche des Bodenbereichs mittels der zweiten Erregerkraft bestimmbar sind.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Vibrationseinheit (1) Teil einer so genannten Vibrationsplatte ist.
10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Vibrationseinheit (5) ein einstellbares statisches Unwuchtmoment und/oder eine

einstellbare Erregerfrequenz für wenigstens eine rotierende Unwucht hat, damit bei einem ersten Unwuchtmoment und/oder bei einer ersten Erregerfrequenz, vorzugsweise zusammen mit der Bodenverdichtung, relative Bodensteifigkeitswerte ermittelbar sind und bei einem zum ersten Unwuchtmoment geänderten zweiten Unwuchtmoment und/ oder bei einer zur ersten Erregerfrequenz geänderten zweiten Erregerfrequenz absolute Bodensteifigkeitswerte ermittelbar sind und bei einem zum ersten bzw. zweiten Unwuchtmoment geänderten dritten Unwuchtmoment und/oder bei einer zur ersten bzw. zweiten Erregerfrequenz geänderten dritten Erregerfrequenz eine Bodenverdichtung vornehmbar ist.

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste bzw. zweite Unwuchtmoment mit zwei gegensinnig, mit gleicher Drehzahl umlaufenden Unwuchten erzeugbar ist, wobei die Drehzahl zur Erzeugung unterschiedlicher Erregerfrequenzen einstellbar ist.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, **gekennzeichnet durch Anzeigemittel**, mit denen Verdichtungsgrade anzeigbar sind, um festzustellen, ob durch weitere Übergänge eine vorgegebene Toleranz überschreitende Verdichtungszunahme noch erreichbar ist.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Messmittel einen Datenspeicher, eine Auswerteeinheit und eine Ortserfassungseinheit zur Bestimmung von Ortskoordinaten eines Bodenbereichs, auf dem sich die Vorrichtung gerade befindet, hat, wobei im Datenspeicher die ermittelten relativen bzw. absoluten Bodensteifigkeitswerte vorzugsweise zusammen mit den dazugehörigen Ortskoordinaten abzuspeicherbar sind und mit der Auswerteeinheit bodenspezifische, in Datenspeicher abspeicherbare Gewichtungswerte aus abgespeicherten Bodensteifigkeitswerten ermittelbar sind, wobei mit den Gewichtungswerten die relativen Werte der Bodensteifigkeit in absolute Werte umwandelbar sind und vorzugsweise eine Übermittlungseinheit vorhanden ist, mit der

diese abgespeicherten Daten an eine Zentrale übermittelbar sind und die Vorrichtung insbesondere eine Anzeige für die absoluten und vorzugsweise für die relativen Werte hat.

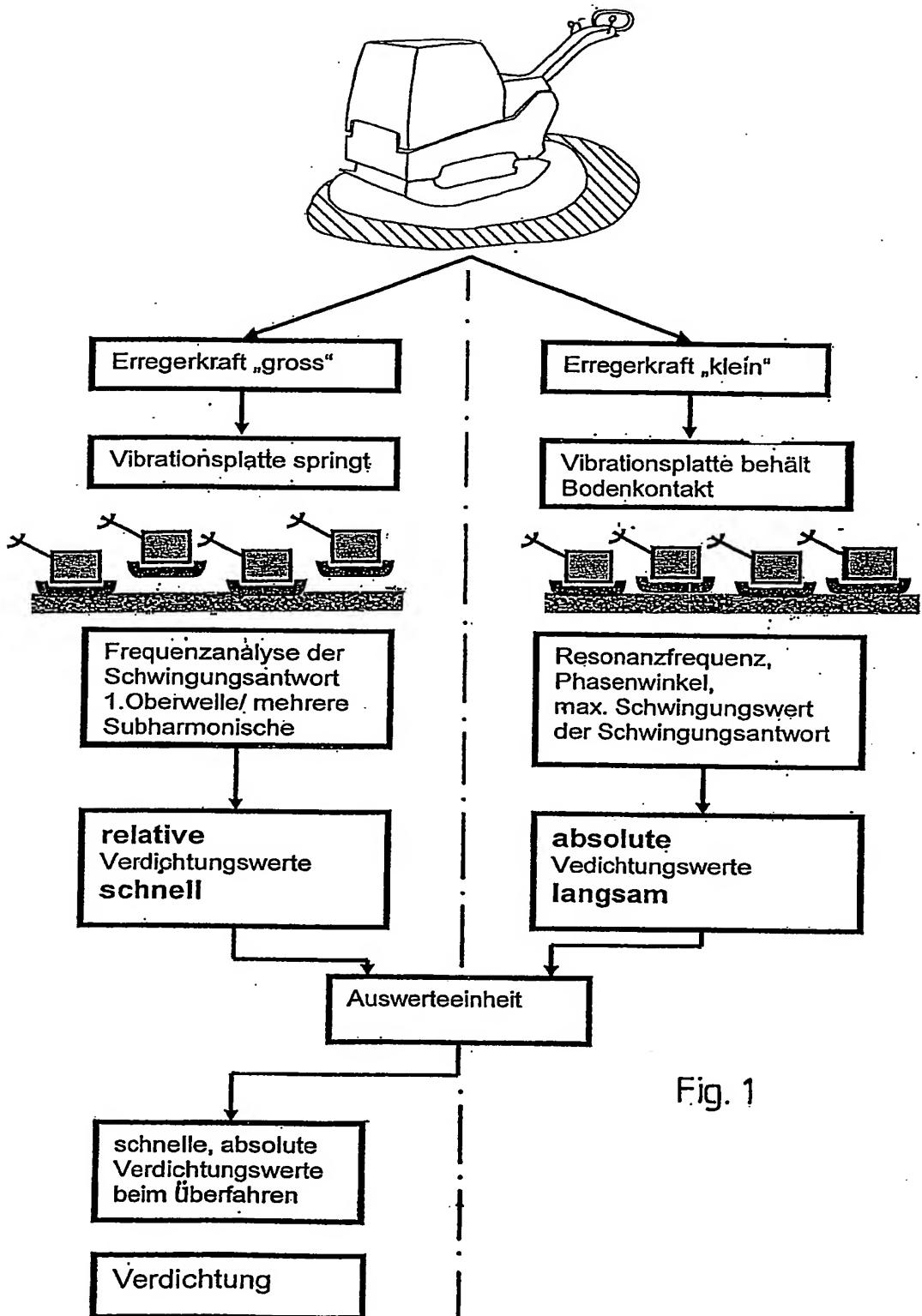


Fig. 1

2/7

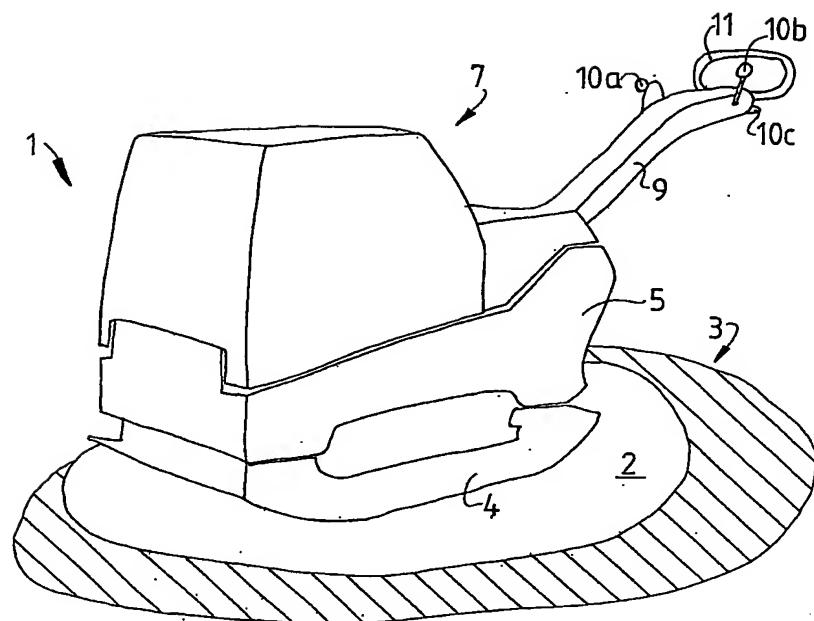


Fig. 2

3/7

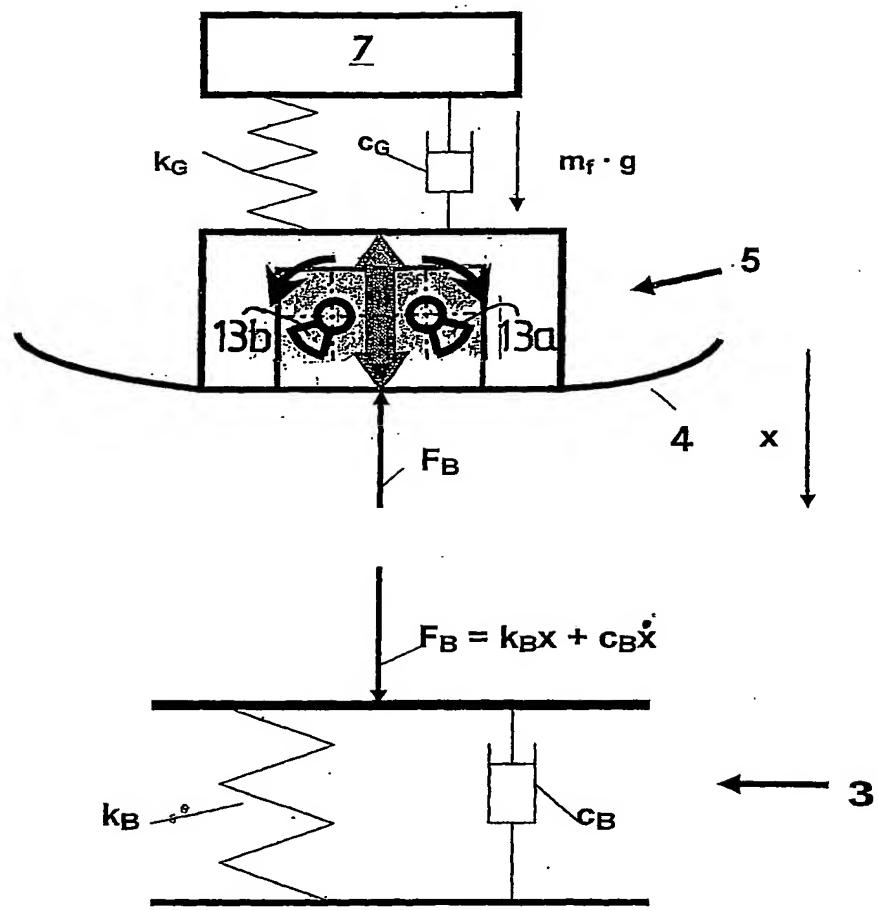
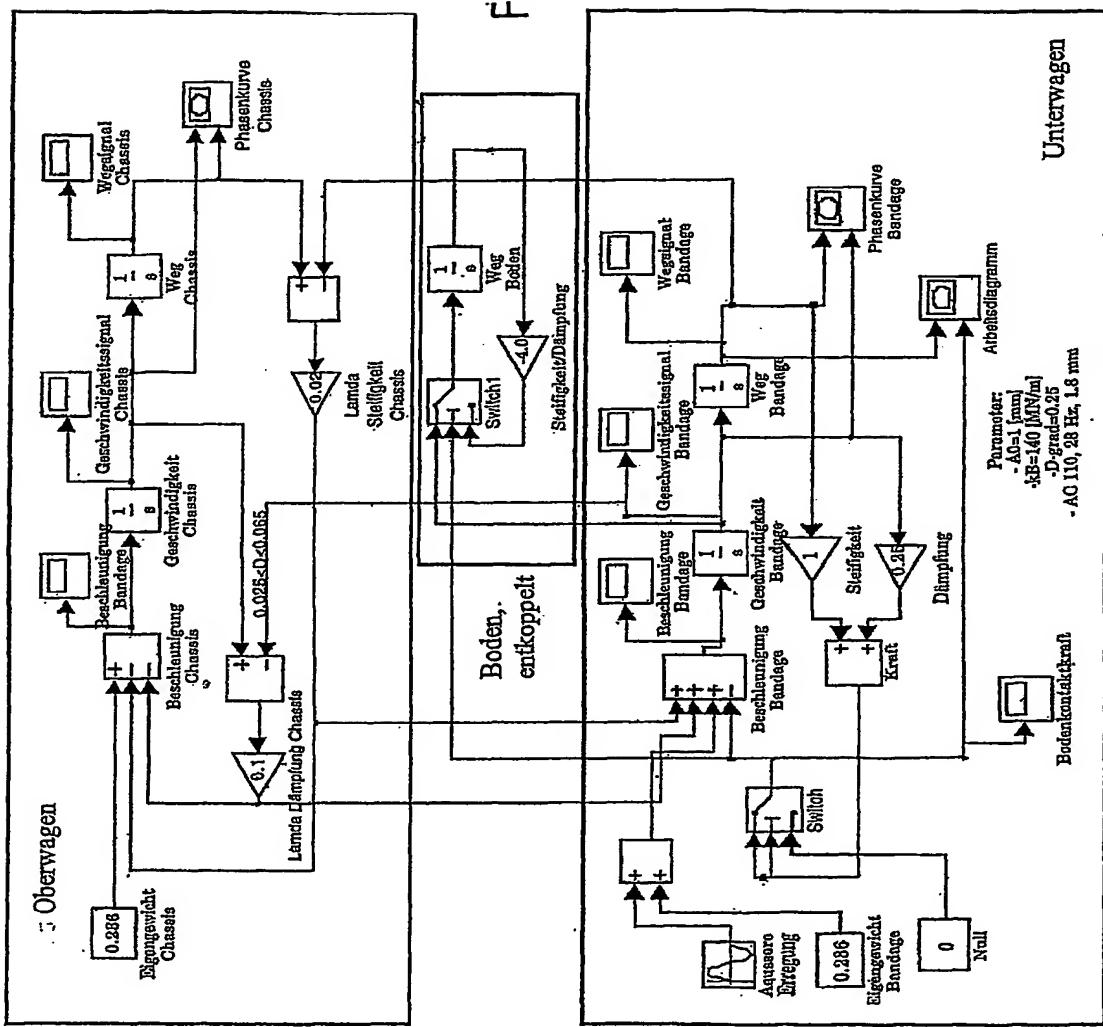


Fig. 3

4 / 7

Fig. 4



5/7

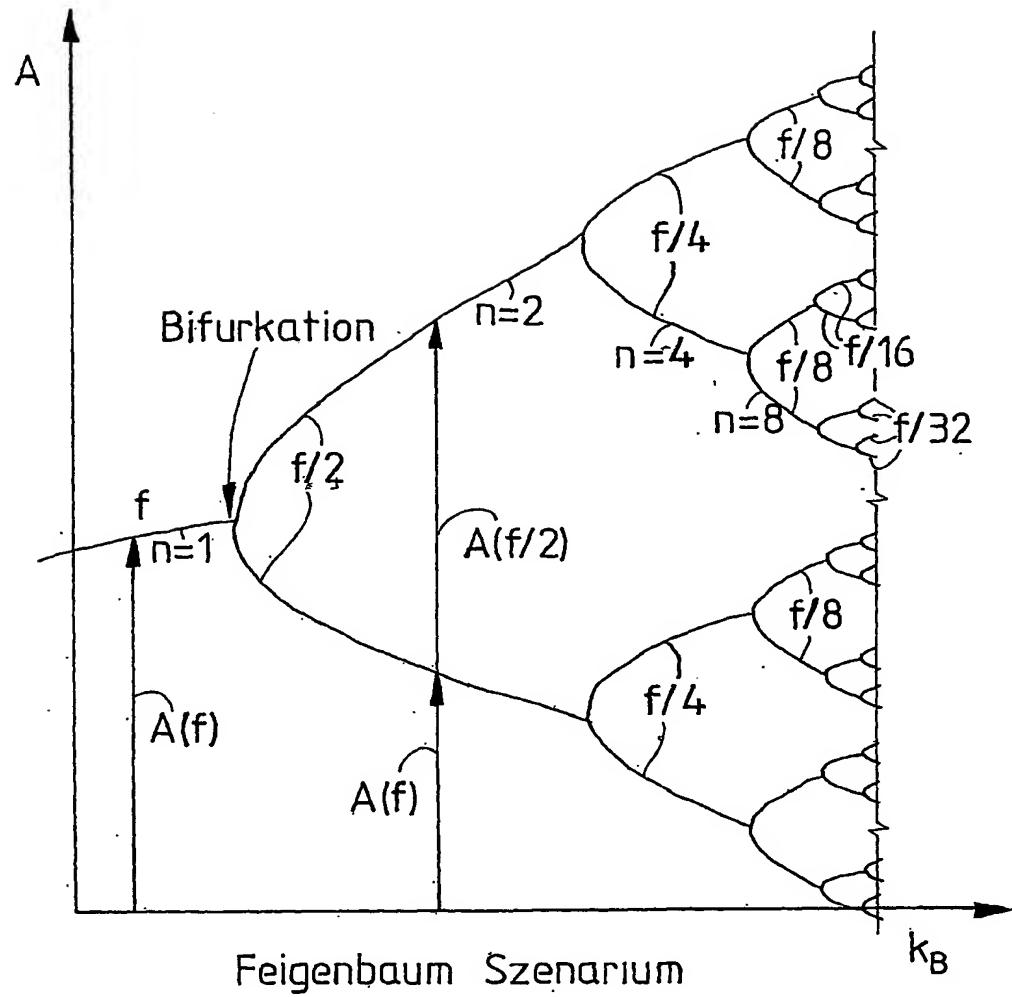
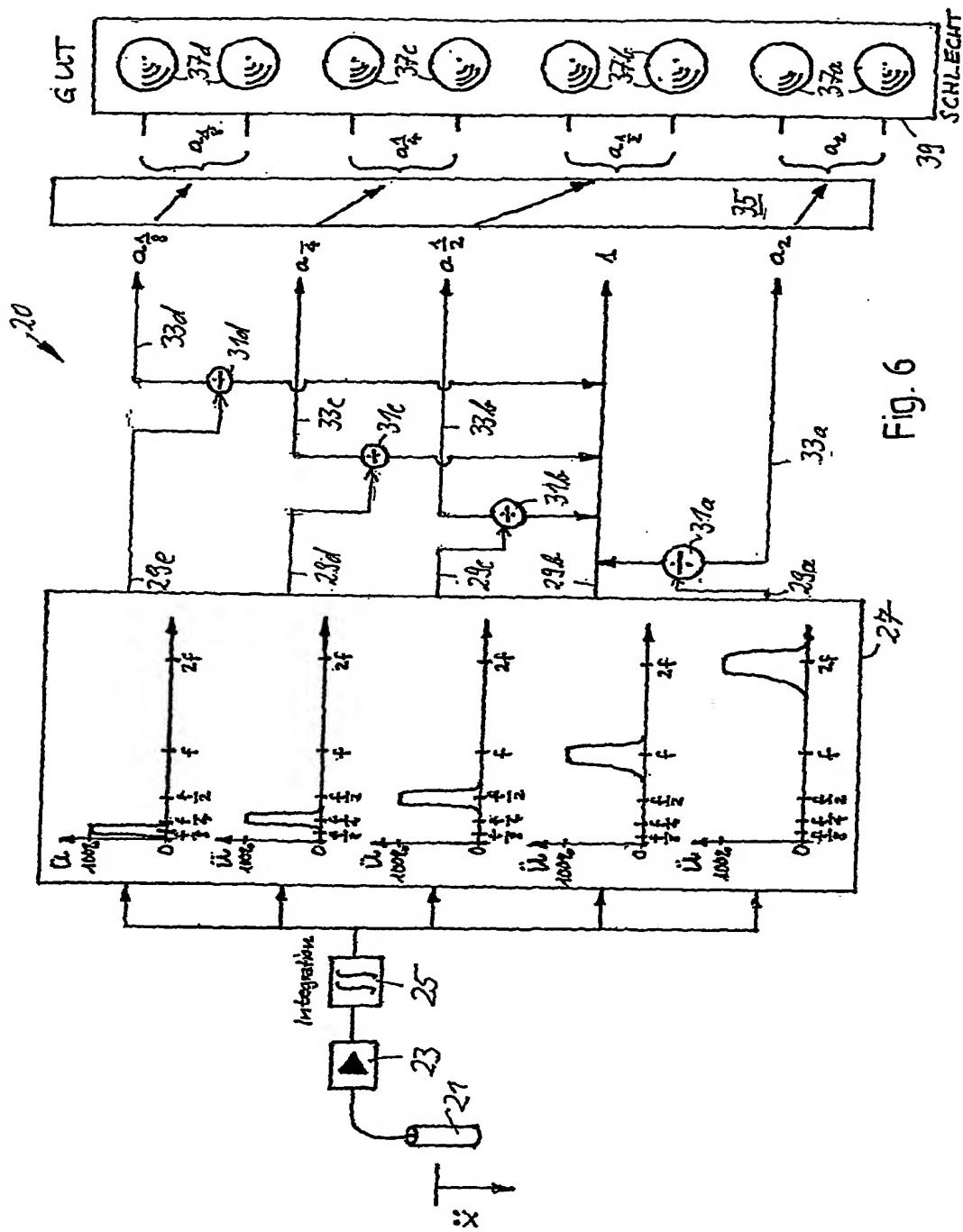


Fig. 5

617



7/7

